

УДК 629.463

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ БОКОВОЙ РАМЫ ЛИТОЙ ТЕЛЕЖКИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Лагерев И.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)

В работе рассмотрены подходы к исследованию усталостной прочности и живучести боковой рамы 18-100 литой тележки грузового вагона. В последнее время отмечается снижение качества изготовления данных боковых рам и повышение количества дефектов, что приводит к росту числа разрушений, приводящих к авариям. В статье приведены расчетные зависимости коэффициента интенсивности напряжений при различных видах усталостной трещины (поверхностная и сквозная). Разработан алгоритм расчета живучести, предполагающий блочное представление нагруженности рамы по сечению с трещиной, учитывающий эффект торможения роста трещины под действием перегрузок. С использованием предложенных подходов выполнен расчет боковой рамы на усталостную прочность и живучесть. Кроме того, выполнены дополнительные численные расчеты живучести в специализированном программном комплексе. Установлено, что наличие в боковой раме трещиноподобных дефектов с размером более 1 мм недопустимо, так как это резко снижает живучесть конструкции.

**Ключевые слова:** *грузовой вагон, литая тележка, боковая рама, трещина, усталость, живучесть, трещиностойкость, нагруженность, дефекты.*

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-04-374-380

Безопасность эксплуатации повреждаемых конструкций обеспечивается правильным выбором материалов, комплексом конструктивно-технологических приемов замедления процесса развития трещины, техникой и регламентом дефектоскопического контроля. Существенную роль в обеспечении безопасности играет и достоверная оценка усталостной прочности и живучести конструкции, поскольку от нее зависит межремонтный период объекта. Актуальной является задача определения длительности роста трещины от момента ее визуального обнаружения до разрушения, которое сможет привести к аварии (крушению поезда).

В расчетах усталостной прочности элементов вагонной тележки определяется момент зарождения трещины при существующей технологии изготовления и реальных

условиях эксплуатации конструкции [1, 2]. В дальнейшем, при расчетах на живучесть оценивается долговечность конструкции с трещиной на стадии ее развития от начального размера до критического [3]. По результатам расчета на живучесть решается ряд важных для практики задач: определение максимально допустимых размеров трещин и трещиноподобных дефектов, обоснование периодичности обследования конструкции, анализ эффективности мероприятий по повышению живучести.

Объектом исследования является боковая рама литой тележки 18-100 грузового вагона (рис. 1). Боковые рамы являются ответственными деталями конструкции, от которых существенно зависит безопасность движения грузовых вагонов.

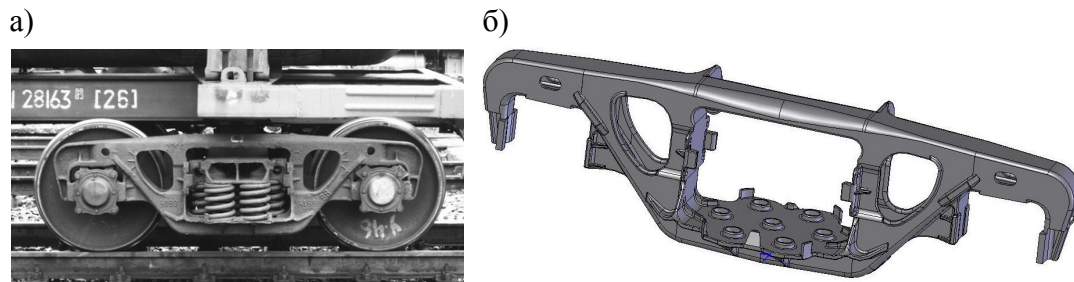


Рис. 1. Литая тележка 18-100 грузового вагона:  
а – тележка под вагоном; б – твердотельная модель для расчетов [2]

Специалистами отмечается снижение качества изготовления данных боковых рам,

повышение количества дефектов (рис. 2) и числа разрушений [4, 5]. Таким образом, те-

ма исследования является актуальной и направлена на решение важной научно-технической задачи повышения надежности и безопасности движения грузовых поездов.

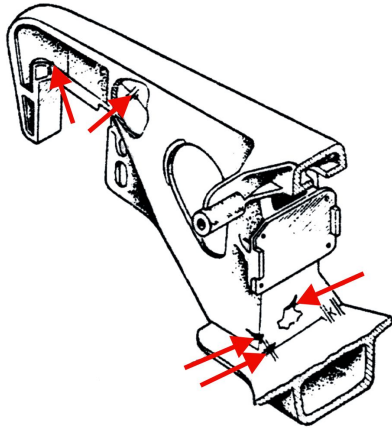


Рис. 2. Наиболее распространенные дефекты боковой рамы

Выполненные расчеты (рис. 3) боковых рам методом конечных элементов [2, 6] показали существенную неравномерность распределения напряжений в конструкции. Данные результаты подтверждаются результатами экспериментальных исследований [2]. Однако не только это обуславливает низкую надежность конструкции. В изломах разрушенных рам обнаружены шлаковые включения, рыхлости, усадочные раковины и другие литейные дефекты, выходящие на поверхность. Эти дефекты являются очагами зарождения усталостных трещин, которые быстро развиваются в условиях отмеченной особенности напряженно-деформированного состояния.

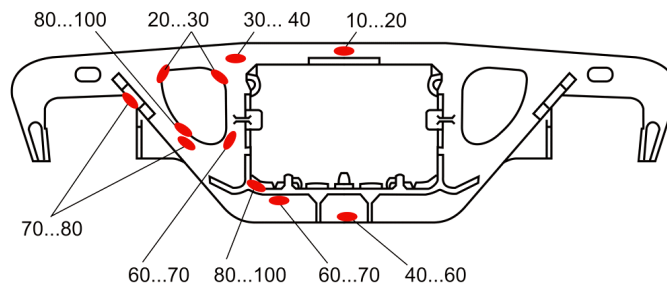


Рис. 3. Эквивалентные напряжения (МПа) от вертикальных нагрузок в наиболее нагруженных зонах боковой рамы [2]

Наиболее быстро трещины растут в буксовых проемах, где действующие эквивалентные напряжения достигают 100 МПа. С ростом трещины выходят по одной из вертикальных стенок на угол окна облегчения и вызывают разрушение всего сечения. Поэтому расчеты на живучесть проводились для наиболее опасного сечения боковой рамы – внутреннего угла буксового проема.

Выполнен численный расчет усталостной прочности боковой рамы с помощью программы Fatigue на основе распределения напряжений в боковой раме, полученного методом конечных элементов. Для уменьшения объема вычислений численный расчет долговечности выполнен для следующих узлов конечноэлементной сетки, лежащих на поверхности рессорного проема (рис. 4).

Боковая рама изготовлена из стали 20ГЛ, которая соответствует нормализованной марганцовистой стали (код 28). Состояние поверхности боковой рамы соответствует от-

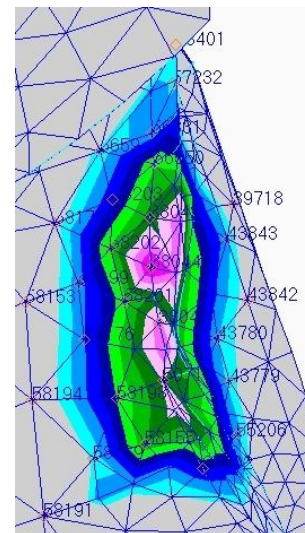


Рис. 4. Узлы буксового проёма для расчета в программе Fatigue

сутствию обработки, упрочнения и сварочных соединений. После подготовки входного файла для программы Fatigue был проведен

расчет методом Смита-Ватсона-Топплера с учетом пластичности по Нейберу на основе главных напряжений с вероятностью работы боковой рамы без повреждений равной 95%. Результаты вычислений для различных узлов рессорного проема приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты расчета ресурса боковой рамы

Номер узла	Накопленное повреждение, циклов	Ресурс, лет
4143	0.03565	28.0
4147	0.02237	44.7
4157	0.02237	44.7
42783	0.03565	28.0
42786	0.17100	<b>5.8</b>
43648	0.03565	28.0
48451	0.03364	29.7
49767	0.03364	29.7
54897	0.02237	44.7
56507	0.00270	371.0
55920	475.100	<b>0.5</b>

Полученные результаты показали, что ресурс боковой рамы по критерию образования трещин составляет 28 лет. Однако в наиболее нагруженных областях трещины могут образовываться даже после года эксплуатации, так как они после изготовления содержат трещиноподобные дефекты, показанные на рис. 2. Поэтому необходимо проводить расчеты ресурса с учетом стадии живучести.

Коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  является важнейшим параметром для расчета живучести конструкции. Он определен методом конечных элементов на основании формулы Ирвина [1, 3]:

$$K_I = \frac{\sigma_x \sqrt{2\pi r}}{\cos(0,5\theta)(1 - \sin(0,5\theta) \sin(1,5\theta))}, \quad (1)$$

где  $\sigma_x$  – расчетное значение осевого напряжения, вычисленное с помощью метода конечных элементов;  $r, \theta$  – координаты точки в зоне пластической деформации.

В результате расчета боковой рамы тележки с трещинами различных размеров по формуле (1) были определены коэффициенты интенсивности напряжений. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от

длины трещины нормального отрыва  $l$  представлена на рис. 5.

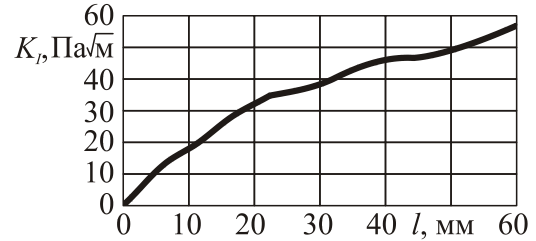


Рис. 5. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от длины трещины  $l$

Из результатов испытаний известен спектр нагруженности боковых рам тележек [7]. Установлено, что функция распределения амплитуд напряжений в опасных сечениях соответствует распределению Релея [8]:

$$F(\sigma_a) = 1 - \exp\left(-\frac{\sigma_a^2}{2S_a^2}\right),$$

где дисперсия  $S_\sigma = 14$  МПа.

Реальный стационарный случайный процесс изменения напряжений представлен в виде блочного, состоящего из базового процесса и последовательности редких выбросов  $B_i$  (рис. 6).

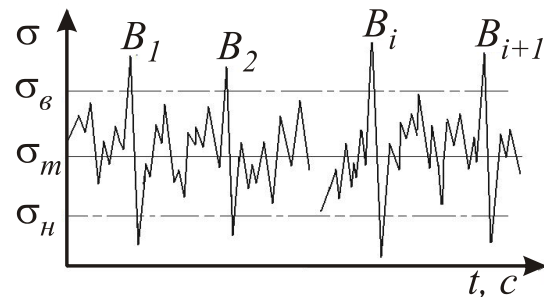


Рис. 6. Схематизация процесса нагружения [8]

Базовый процесс отличается от исходного тем, что его функция плотности распределения экстремумов является усеченной. Границы усечения сверху  $\sigma_\epsilon$  и снизу  $\sigma_n$  составляют 3 стандарта процесса. Наличие выбросов приводит к возникновению эффекта торможения трещины, который связан с усиленным по сравнению с базовым процессом ростом зоны пластичности в вершине трещины, а также со смыканием в ряде случаев ее берегов [9]. Если считать, что процесс является узкополосным, то эквивалентную амплитуду напряжений базового процесса можно найти следующим образом:

$$\sigma_{акв} = \sqrt{2}S_{\sigma} = 19,84 \text{ МПа.}$$

Перейдем от случайного нагружения к регулярному, оставив в качестве элемента случайности перегрузки (рис. 7). Максимальный уровень выброса принимается из условия появления выброса один раз за весь планируемый срок эксплуатации объекта, минимальный уровень определяется как уровень, ниже которого влиянием выброса на скорость роста трещины можно пренебречь. Полученная таким образом область значений рассматриваемых выбросов разбивается на 5 подинтервалов, в соответствии с принятыми интервалами устанавливаются значения уровней выбросов. Начало первого интервала – 45 МПа, конец последнего – 90 МПа.

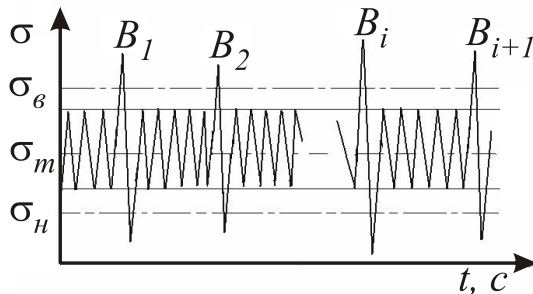


Рис. 7. Переход к регулярному процессу

Вероятность попадания амплитуды  $\sigma_a$  в каждый из интервалов определяется следующим образом:

$$P_i = \int_{J_i}^{J_{i+1}} f(\sigma_a) d\sigma_a, \quad (2)$$

где  $f(\sigma_a)$  – плотность распределения амплитуд напряжений;  $J_i$  – начало  $i$ -го подинтервала;  $J_{i+1}$  – конец  $i$ -го подинтервала.

Число выбросов в каждом подинтервале вычисляется следующим образом:

$$N_{pi} = P_i v_6, \quad (3)$$

где  $v_6$  – число циклов в годовом блоке нагружения боковой рамы ( $v_6 = 12 \cdot 10^6$ )

На основании выражений (2) и (3) определено, что за год эксплуатации боковой рамы будет отмечено 70030 выбросов. Зная количество перегрузок в каждом из интервалов, распределим выбросы равномерно по всему блоку нагружения через каждые 171 циклов. Последовательность выбросов моделируем методом статистических испытаний.

Для учета эффекта торможения роста трещины используется модель Уилера. Рас-

четы живучести, проводившиеся ранее на ее основе для ряда режимов случайного и блочного нагружений, показали хорошее соответствие экспериментальным данным [10].

Расчет на живучесть с учетом эффекта задержки трещины проводится по формуле:

$$l_N = l_0 + \sum_{i=1}^N c_{pi} \Delta l_i,$$

где  $l_N$  – расчетная длина трещины (растет до предельной величины  $l_{пр}$ );  $l_0$  – начальная длина трещины (размер трещиноподобного дефекта);  $\Delta l_i$  – прирост трещины на  $i$ -м цикле нагружения;  $c_{pi}$  – поправочный коэффициент, учитывающий замедленный рост трещины при низком уровне нагрузки после действия нагрузки более высокого уровня ( $c_{pi} \leq 1$ ).

Замедленный рост трещины при уменьшении уровня нагрузки продолжается до тех пор, пока пластическая зона перед распространяющейся трещиной радиусом  $r_{pi}$  не достигнет границы пластической зоны радиусом  $r_p^n$ , обусловленной предшествующим более высоким уровнем нагрузки. Поправочный коэффициент  $c_{pi}$  определяется следующим образом:

$$c_{pi} = \begin{cases} \left( \frac{2r_{pi}}{l^* - l_i} \right)^{m^*} & \text{при } l_i + 2r_{pi} < l^*; \\ 1 & \text{при } l_i + 2r_{pi} \geq l^*, \end{cases}$$

где  $l_i$  – текущая длина трещины после приложения  $i$  циклов нагружения;  $l^*$  – расстояние до границы пластической зоны, обусловленной нагрузкой более высокого уровня;  $m^* = 1$  – экспериментальный параметр [9, 10].

Радиусы пластических зон определяются через коэффициенты интенсивности напряжений. Процесс роста усталостной трещины моделируется на основании кинетической диаграммы усталостного разрушения, описываемой уравнением Уолкера-Пэриса [9].

Расчеты выполнены численно в программном комплексе собственной разработки. Расчетные параметры материала приняты согласно данным исследования [11]. Результаты расчета живучести боковой рамы при различных начальных длинах трещины приведены в табл. 2.

Согласно результатам расчета можно сделать вывод, что наличие в боковой раме

трещиноподобных дефектов с размером более 1 мм недопустимо, так как это резко снижает живучесть конструкции.

В дальнейшем разработанный подход также целесообразно применить при реше-

нии задачи повышения ресурса проушин цилиндрических шарниров манипуляционных систем мобильных транспортно-технологических машин [12].

Таблица 2

Результаты расчета ресурса рамы при различных начальных длинах трещины

$l_0$ , м	$l_{пр}$ , м	$N$ , циклов	Ресурс, лет
0,001	0,068 (разрушение рессорного проема)	241859526	20,15
0,002		129871964	10,82
0,005		57125432	4,760
0,010		25568112	2,130
0,015		12609898	1,050
0,020		9816342	0,818

### Список литературы

1. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / Руководство и справочное пособие под ред. С.В. Серенсена, 3-е изд. / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение., 1975. – 488 с.

2. Лагерев, И.А. Оценка ресурса литых деталей железнодорожного подвижного состава / И.А. Лагерев // Сборник материалов международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых». – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009 г. – Ч. 3. – С. 150-152.

3. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.

4. Сенько, В.И. Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов / В.И.Сенько, М.И. Пастухов, С.В. Макеев и др. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2010. – Т.1. – №4. – С. 13-18.

5. Харитонов, Б.В. Пути снижения повреждаемости боковых тележек грузовых вагонов на сортировочных горках: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Борис Владимирович Харитонов. – Москва: ВНИИЖТ, 1999. – 132 с.

6. Рыбников, Е.К. Инженерные расчёты механических конструкций в системе MSC.Patran-Nastran / Е.К. Рыбников, С.В. Володин, Р.Ю. Соколов. – М.: MacNeal-Schwendler Corporation, 2003. – 130 с.

7. Даниленко, С.С. Исследование напряженно-деформированного состояния рамы тележки 18-100 с учетом технологиче-

ского рассеивания геометрических параметров ее сечения: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Сергей Святославович Даниленко. – Брянск: БГТУ, 2004. – 137 с.

8. Приходько, А.П. Расчет характеристик выносливости, параметров нагруженности и показателей надежности несущих элементов конструкций / А.П. Приходько, В.И. Шахов, А.Б. Сурвилло и др. // Труды ЦНИИ МПС, вып. 548. – М., 1976. – С. 110-129.

9. Шлющенко, А.П. Механика разрушения и расчеты на прочность и долговечность элементов машин и конструкций с трещинами / А.П. Шлющенко. – Брянск, 1996. – 228 с.

10. Willenborg, J.J. A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept / J.J. Willenborg, K.M. Fngle, N.A. Wood // AFFDL-TR-71-1. – 1971.

11. Северинова, Т.П. Исследование характеристик трещиностойкости стали типа 20ГФЛ при регулярном и случайном нагружении / Т.П. Северинова, А.Г. Козлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1994. – №2. – С. 32-35.

12. Лагерев, И.А. Повышение трещиностойкости и живучести элементов узлов соединений секций грузоподъемных стрел крано-манипуляторных установок мобильных машин / И.А. Лагерев / Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – №2. – С. 16-22.

### Сведения об авторе

Лагерев Игорь Александрович – доктор технических наук, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», *lagerev-bgu@yandex.ru*. ORCID: 0000-0002-0921-6831.

## FATIGUE STRENGTH ANALYSIS OF A FREIGHT CAR BOGIE'S SIDE FRAME

Lagerev I.A.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

An approaches to the study of the fatigue strength of a freight car 18-100 bogie's side frame are under consideration in this article. There is a decline of the quality of the manufacture side frames and increase of the number of defects, which leads to an increase the number of accidents. The relationship of the stress intensity factor and crack length for different types of fatigue cracks (surface crack and full perforation) was introduced. The algorithm of a bogie with a crack fatigue calculation was introduced. The inhibition of crack growth under overloading was taking into account during calculation. The additional numerical calculation of fatigue strength was performed by the specialized software package. Some defects of bogie larger than 1 mm is unacceptable as it dramatically reduces the fatigue strength.

**Key words:** freight car, bogie, side frame, fracture, fatigue, durability, crack resistance, loads, defects.

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2017-03-04-374-380

### References

1. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shneyderovich R.M. *Nesuchshaya sposobnost i raschety mashin na prochnost* [Bearing capacity and calculations of machine parts for strength]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 488 p. (In Russian)

2. Lagerev I.A. Life assessment of cast parts of rolling stock analysis. *Sbornik materialov konferentsii «Nauchnomy progressu – tvorchestvo molodykh»*, 2009, Part. 3, pp. 150-152. (In Russian)

3. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics. Leyden, Noordhoff International Publishing, 1974.

4. Senko V.I., Pastukhov M.P., Makeev S.V. Analysis of the causes of damage and the possibility of extending the service life of the side frames of car bogies. *Vestnik Gomelskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, 2010, Vol. 1, No. 4, pp. 13-18. (In Russian)

5. Kharitonov B.V. Approaches to damage reducing of the side frames of the bogies of freight cars on the marshalling yard. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow: VNIIZhT, 1999. 132 p. (In Russian)

6. Rybnikov E.K., Volodin S.V., Sobolev R.Yu. Engineering analysis of mechanical structures in the MSC.Patran-Nastran. Moscow, MacNeal-Schwendler Corporation, 2003. 130 p. (In Russian)

7. Danilenko S.S. Investigation of the stress-strain state of the frame of the 18-100 bogie taking into account technological dispersion of geometrical parameters of its cross section.

Diss. Cand. Sci. (Engineering). Bryansk: BSTU, 2004. 137 p. (In Russian)

8. Prikhodko A.P., Shakhov V.I., Survillo A.B. The estimation of the strength parameters of load and reliability of the structural elements. *Trudy TsNII MPS*, 1976, Vol. 548, pp. 110-129. (In Russian)

9. Shlyushenkov A.P. *Mekhanika razrusheniya i raschety na prochnost i dolgovechnost elementov mashin i konstruktsiy s treschinami* [Fracture mechanics and fatigue strength analysis of of machines parts and structures with cracks]. Bryansk, 1996. 156 p. (In Russian)

10. Willenborg J.J., Fingle K.M., Wood N.A. A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept. *AFFDL-TR-71-1*. 1971.

11. Severinova T.P., Kozlov A.G. Issledovanie kharakteristik treshchinostoykosti stali tipa 20GFL pri regularnom i sluchaynom nagruzheniyakh. *Vestnik VNIIZhT*, 2014, No. 2, pp. 32-35. (In Russian)

12. Lagerev I.A. Povyshenie treshchinostoykosti i zhivuchesti elementov uzlov soedineniy sektsiy gruzopodemnykh strel kranomanipulyatornykh ustanovok mobilnykh mashin. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 16-22. (In Russian)

### Author's information

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Vice rector for Innovations at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, [lagerev-bgu@yandex.ru](mailto:lagerev-bgu@yandex.ru).

ORCID: 0000-0002-0921-6831.

Дата принятия к публикации  
(Date of acceptance for publication)  
04.07.2017

Дата публикации  
(Date of publication):  
25.12.2017

